

高水平放射性废物地质处置： 关键科学问题和相关进展

王驹

核工业北京地质研究院, 北京 100029

摘要 如何安全处置高水平放射性废物是科学、技术和工程界面临的挑战性问题。本文介绍高放废物的安全处置方法, 废物地质处置地下实验室的建设及其实验进展, 重点讨论了高放废物地质处置中, 处置库场址地质演化的精确预测、深部地质环境特征、多场耦合条件下(中高温、地壳应力、水力作用、化学作用、生物作用和辐射作用等)深部岩体、地下水和工程材料的行为、低浓度超铀放射性核素的地球化学行为与随地下水迁移行为、处置系统的安全评价等关键科学问题。

关键词 放射性废物; 地质处置; 安全评价

2015年11月12日, 芬兰政府批准了芬兰放射性废物管理公司(POSIVA)提交的高水平放射性废物(简称高放废物)处置库建造申请。这是世界上第一个获准开建的高放废物深地质处置库, 是国际放射性废物管理界令人振奋的大事。

高放废物是指核反应堆乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体。根据中国放射性废物分类, 高放废物分为高放废液和高放固体废物两类: 高放废液指的是放射性浓度大于 4×10^{10} Bq/L的废液; 高放固体废物分为两种, 第一种其核素的半衰期大于5年, 但低于或等于30年, 释热率大于 2 kW/m^3 或活度大于 4×10^{11} Bq/kg, 第二种废物中核素的半衰期大于30年, 释热率大于 2 kW/m^3 或活度大于 4×10^{10} Bq/kg。

中国的高放废物主要来源于压水堆核电站、国防核设施、CANDU反应堆和将来可能建造的高温气冷堆。压水堆乏燃料经后处理, 对其产生的高废液进行固化之后将产生高放玻璃固化体、高放固体废物和 α 废物。国防核设施生产和军工核设施治理和退役, 也将产生高放玻璃固化废物、高放固体废物和 α 废物。此外, 研究堆和核潜艇的乏燃

料经后处理也将产生高放废物, 但其数量较少。另外需要进行深地质处置的还包括长寿命中放废物和高危险度放射源。

由于高放废物是一种放射性强、毒性大、含有半衰期长的核素并且发热的特殊废物(图1), 对其进行安全处置难度极大, 面临一系列科学、技术、工程、人文和社会学的挑战, 其最大的难点在于使高放废物与生物圈进行充分、可靠和长期的隔离, 且隔离时间长达1万年甚至更长。

1 高放废物安全处置方法

对于高放废物安全处置, 曾经提出“太空处置”、“深海沟处置”、“冰盖处置”、“岩石熔融处置”等方案。经过多年的研究和实践, 目前普遍接受且技术

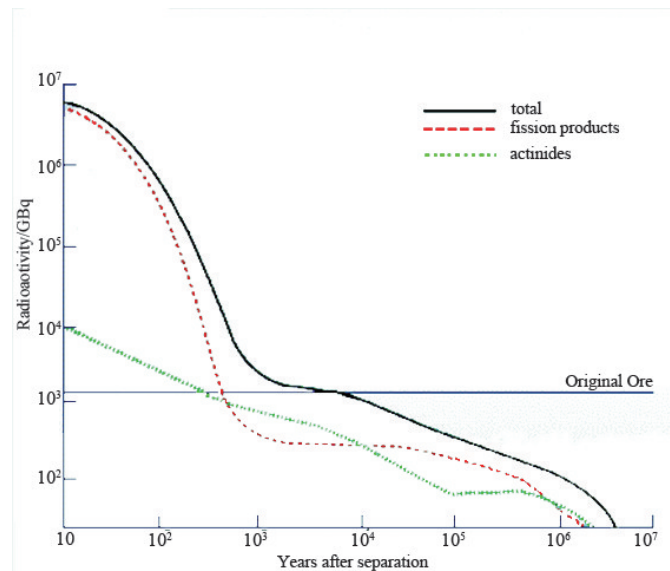


图1 1吨压水堆乏燃料后处理产生的高放废物的放射性及其衰变

Fig. 1 Radioactivity and decay of HLW produced from reprocessing of one tonne of PWR spent fuel

上可行的方案是深地质处置, 即把高放废物埋在距离地表深500~1000 m的地质体中, 使其永久与人类的生存环境隔离。埋藏高放废物的地下工程即称为“高放废物处置库”。

高放废物处置库采用的是“多重屏障系统”设计思路(图2), 即把高放废

收稿日期: 2016-06-15; 修回日期: 2016-07-21

作者简介: 王驹, 研究员, 研究方向为高放废物地质处置, 电子邮箱: wangju9818@163.com

引用格式: 王驹. 高水平放射性废物地质处置: 关键科学问题和相关进展[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 51-55; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.15.005

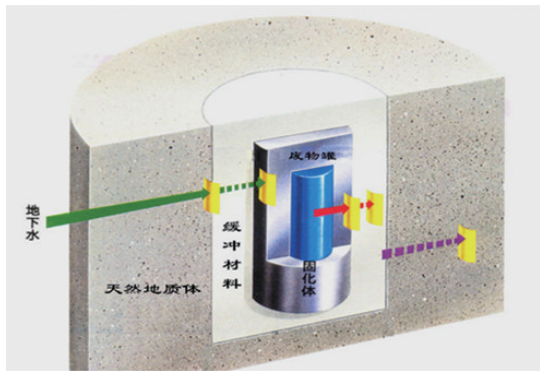


图2 高放废物处置库多重屏障

Fig. 2 Multi-barrier of high-level radioactive waste repository

物盛装在废物罐中、外面包裹缓冲材料,再向外为围岩(花岗岩、黏土岩、泥岩、凝灰岩、岩盐等)。一般把废物体、废物罐和缓冲回填材料称为“工程屏障”,把周围的地质体称为“天然屏障”。

各国根据地质条件的不同,选择了不同岩性作为天然屏障,如瑞典、芬兰、加拿大、韩国、印度选择花岗岩作为处置库的天然屏障;法国、比利时选择黏土岩;瑞士尚未确定是选择花岗岩还是黏土岩作为处置库围岩;德国原定选在岩盐之中,但后来决定重新启动选址程序,至今未确定处置库围岩类型。

由于高放废物中含有铀、钚、镅、锔等放射性核素,它们具有放射性强、毒性大和半衰期长等特点,因此,对其进行地质处置的难度极大。对该类废物的处置是一项极其复杂的系统工程,它具有长期性、复杂性、艰巨性、综合性和探索性等特征,主要表现在以下2方面。

1) 研究开发难度大。建造高放废物地质处置库这样的地下工程,在科学、技术和工程上面临一系列重大难题,包括:如何选择安全的场址、如何评价场址的适宜性、如何选择隔离高放废物的工程屏障材料、如何设计和建造处置库、如何评价万年以上的长时尺度下处置系统的安全性能等。这些问题涉及的均是前沿交叉的科学问题,其学科领域包括地质学、水文地质学、放射化学、岩石力学、工程科学、材料科学、矿物学、热力学、核物理、辐射防护、计

算机科学以及社会科学、经济科学等。另外,开发处置库是一个长期的系统化的多学科联合攻关的过程,一般需要经过基础研究、处置库选址、地下实验室研究、处置库建设等阶段。

2) 安全评价期极长。国际上一般认定的安全评价期约为1万年(现在美国要求有更长的安全评价期)。这是世界上迄今为止要求安全评价期最长的工程,缺乏可借鉴的前人经验,因此具有很大的探索性。由于安全评价期要求极长,这就给预测在这漫长的时间长河中天体、地质和人类生存环境的变化增加了许多不确定性。

此外,社会公众对高放废物安全处置极为关注,公众是否接受很大程度上决定了处置工程的成败。社会公众、政治、伦理和地方政府等因素的影响,有时甚至会起到推迟或取消原定计划的作用。

2 高放废物地质处置地下实验室

地下研究实验室是开发高放废物处置库过程中必不可少的关键设施,它用于了解深部地质环境、水文地质环境和地应力状况,获取深部岩石和水样品,在真实的深部地质环境中考验工程屏障的长期性能。此外,地下实验室的建设也是开发和验证处置库施工、建造、运行、回填和封闭技术的重要手段,可以为处置库安全评价、环境影响评价提供必不可少的基础数据,并提高公众对高放废物处置安全性能的信心。

在地下实验室中开展的实验包括:开挖方法实验、开挖损伤实验、场址评价方法实验、水文地质实验、放射性核素迁移实验、气体迁移实验、加热实验、多场耦合实验、工程屏障系统长期性能

实验、地下工程稳定性实验、施工方法实验、施工工艺实验、处置工艺实验、原型处置库实验、示范处置等。

地下实验室包括“普通地下实验室”和“特定场址地下实验室”。前者主要用于开发处置技术,与未来处置库场址的具体位置没有特定的联系;后者建造于未来的处置库的场址上,对场址评价、开发技术、集成和验证安全评价技术等起着重要作用,并极有可能逐步演变成真实的处置库。

2.1 国际先进的高放废物地下实验室

自20世纪60年代高放废物地质处置研究开发以来,高放废物地质处置在工程的实施方面取得了许多重大进展,地下实验室已经成为各国开展高放废物地质处置研究的必须和常规手段。其中表现最为突出的国家为芬兰、法国和瑞典。

1) 芬兰。芬兰有2个核电站(4个核电机组),核电占总发电量的32%。预计需处置的乏燃料为6500 t。芬兰采用的是乏燃料直接进行“深地质处置”的技术路线,拟建在420 m深的花岗岩基岩之中,为竖井—斜井—巷道型。据估算,最终处置芬兰乏燃料的总费用为46亿芬兰马克(不包括研究开发费用)。2001年5月芬兰政府批准Olkiluoto核电站附近的乏燃料最终处置库场址,2015年11月12日芬兰政府批准处置库的建造。预计将于2023年建成处置库,并开始处置乏燃料。在建设处置库之前,芬兰在Olkiluoto建设了名为Onkalo(图3)的地下实验室。

2) 瑞典。瑞典的情况与芬兰类似,有4个核电站(12个核电机组,其中2个已经退役),核电占总发电量的51.6%。需处置的乏燃料为7960 t。采用的是乏燃料直接进行“深地质处置”的技术路线,处置库为KBS-3型多重屏障系统,拟建在深500 m左右的花岗岩基岩之中。早在1972年第一座核电站建设发电时,政府就已要求上缴资金预留用于废物管理。2009年6月瑞典政府批准了乏燃料处置库的最终场址——位于Forsmark核电站附近的场

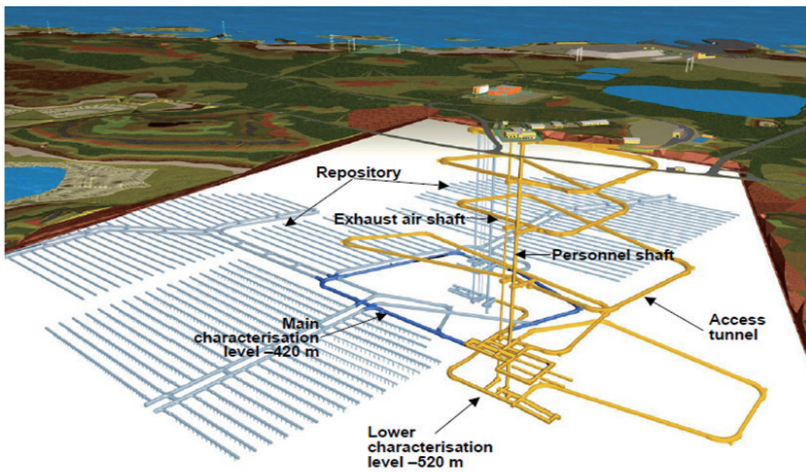


Fig. 3 The underground research laboratory and repository for geological disposal of high level radioactive waste in Finland

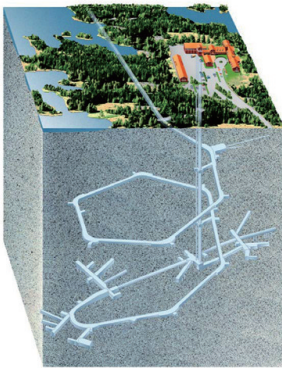


图4 瑞典Äspö地下实验室地下巷道透视图

Fig. 4 Underground tunnels of the Äspö underground research laboratory in Sweden

址。2011年瑞典放射性废物管理公司(SKB)已经向瑞典政府递交处置库建造申请,预计2016年获得批准。瑞典从1976年开始处置技术研发,1995年建设了世界著名的Äspö大型地下实验室(图4、图5)。

3) 法国。法国有59个核电机组,核电占总发电量的77%。预计到2040年将有 $5.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ 的高放废物玻璃固化体和 $8.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的超铀废物需要处置。采用的是深部地质处置技术路线,选择的围岩为黏土岩。选址工作始于20世纪80年代,目前已经确定了Meuse/Haute Marne场址(图6)(黏土岩),并于2004年建成了地下实验室。法国于2010年并启动了地质处置库计划,即(Cigeo-地质处置工业中心)计

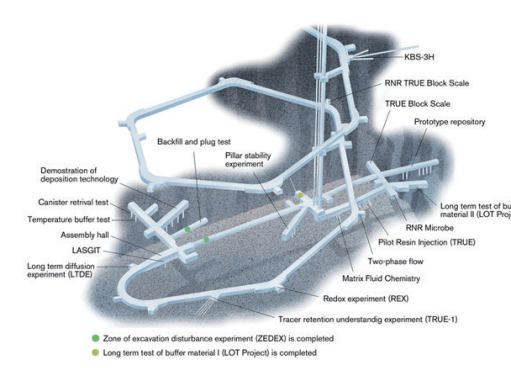


图5 瑞典Äspö地下实验室的地下巷道及其中开展的各种实验

Fig. 5 Underground tunnels and the in-situ tests in the Äspö underground research laboratory in Sweden

划。经2013年的公开论证后,法国国家放射性废物管理中心将于2015年提交处置库建库申请,预计2019年获得处置库建造许可,2025年建成处置库。

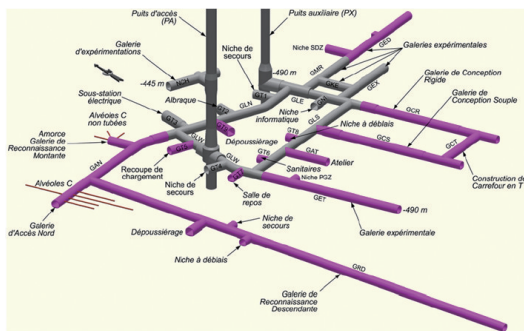


图6 法国地下实验室的地下巷道及其中开展的实验
Fig. 6 Underground tunnels and the in-situ tests in the French underground research laboratory

大量地下实验室工程的建设与应用,对高放废物地质处置技术的发展起到了重要的推动作用。

2.2 中国建设“特定场区地下实验室”的战略思路

中国高放废物地质处置研究工作于20世纪80年代中起步,2000年以前开展了跟踪性研究。进入21世纪,中国高放废物深地质处置进入了一个稳步发展的阶段,在法律法规、技术标准、战略规划、选址和场址评价、工程屏障研究、处置库和地下实验室概念设计、核素迁移和安全评价研究等方面取得了显著进展。主要包括2006年原国防科工委、原环境保护总局和科技部联合制定的《高放废物地质处置研究开发指南》,2013年国家核安全局颁布的《高放废物地质处置设施选址》核安全导则。《高放废物地质处置研究开发指南》中确立了中国高放废物地质处置“三部曲”式的技术路线,确定了2020年建成地下实验室(图7)、2050年建成中国高放废物处置库的目标。

在技术进展方面,2011年甘肃北山预选区被确定为中国高放废物地质处置库首选预选区,建立了系统的选址和场址评价方法技术体系,确定了内蒙古高庙子膨润土为中国高放废物处置库的首选缓冲回填材料,获得了一批关键放射性核素的迁移行为数据,开展了初步的安全评价等。

“十二五”期间,中国在地下实验室规划方面,借鉴国外地下实验室发展情况,结合中国高放废物地质处置研究进

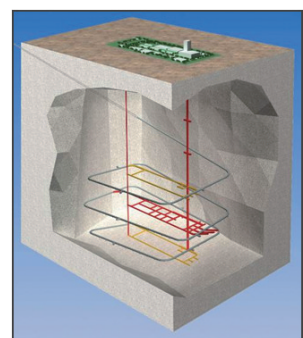


图7 中国地下实验室示意
Fig. 7 Schematic diagram of China's underground research laboratory

展和实际需要,确定了首个高放废物地质处置地下实验室的总体定位,即:建设在特定场区(处置库重点预选区)有代表性的岩石之中、位于约 500 m 深度、功能较为完备且具有扩展功能的、为高放废物地质处置研究开发服务和场址评价服务的、具有国际先进水平的科研设施和平台,也即“特定场区型”地下实验室。完成了两份重要报告,即《中国高放废物地质处置地下实验室有关战略问题的总体考虑》和《国家高放废物地质处置地下实验室战略规划及实施方案》。这两份报告提出了中国地下实验室的总体定位、功能、技术路线、建设原则、规划目标、规划内容、时间节点、经费需求和具体实施方案。

在处置库场址筛选方面,加大了对甘肃北山预选区的场址评价工作,至 2016 年 6 月底,已经在甘肃北山完成了 32 个钻孔。同时,还在新疆、内蒙古筛选出 6 个预选地段,并开展了初勘。工程屏障方面,建立了膨润土研究大型实验台架(图 8),加大了膨润土的工程性能研究。在地下实验室方面,启动了地下实验室安全技术研究和地下实验室前期工程科研 2 个项目,制定了地下实验室选址准则,2016 年筛选出甘肃北山的新场场址——中国首个地下实验室场址(图 9)。此外,还在甘肃北山建设了“北山坑探设施”,用于地下实验室安全技术研究。

在国际合作方面,与国际原子能机构(IAEA)开展了长期的技术合作,与瑞典、芬兰和法国签订了合作备忘录,重点开展地下实验室选址和设计方面的合作



图 8 中国首台缓冲回填材料大型实验台架
Fig. 8 The first large-scale Mock-up facility for buffer and backfill material research in China

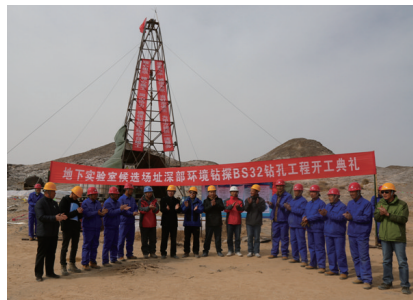


图 9 甘肃北山新场地下实验室场址评价
钻孔施工开工仪式(2016 年 3 月 18 日)
Fig. 9 The opening ceremony for a
bore hole drilling at Xinchang, the site
for China's underground research
laboratory (March 18, 2016)

3 高放废物地质处置的关键科学问题

高放废物安全处置须解决的重大科学问题包括:处置库场址地质演化的精确预测、深部地质环境特征、多场耦合条件下(中—高温、地应力、水力作用、化学作用和辐射作用)等深部岩体、地下水和工程材料的行为、低浓度超铀放射性核素的地球化学行为与随地下水迁移行为以及超长时间尺度下处置系统的安全评价等。此外,高放废物处置还面临一系列社会和人文科学方面的难题。

1) 处置库场址演化的精确预测。由于高放废物含有长半衰期的放射性核素,这就要求处置库要有 $(1\sim 10)\times 10^5$ 年甚至更长的安全期,这是目前任何一个工程所没有的要求,因此需要对处置库场址的演化作出预测,尤其是对处置库建成后 $(1\sim 10)\times 10^5$ 年场址的演化作出精确预测,包括:地质稳定性的预测、区域地质条件的预测、区域和局部地下水流场和水化学的预测、未来气候变化的预测、地面形变和升降的预测、地质灾害(火山、地震、断裂、底辟作用等)的预测等。

2) 深部地质环境特征。地质处置库一般位于 300~1000 m 深的地质体中,这一深度地质体的环境特征为中高温、中高地应力、还原环境、地下水作用、深部气体作用,还由于放射性废物

的存在,处置库中存在强的辐射环境。目前的研究对深部地质环境知之甚少,并且研究方法和手段也极其缺乏。

3) 深部岩体的工程性状及其在多场耦合条件下岩体的行为。与浅部岩体不同,深部岩体结构具有非均匀、非连续特点,一些区域处于由稳定向不稳定发展的临界高应力状态,即不稳定的临界平衡状态。由于高放废物衰变热与辐射作用的存在,地质处置库的深部围岩所处的“场”发生了巨大的变化,在中—高温、地壳应力、水力、化学和辐射等作用的耦合下,深部裂隙岩体将发生扰动的复杂响应。深部岩体的这些工程性状及其在多场耦合条件下受开挖与热载作用时岩体响应规律,属于前沿性科学难题。

4) 多场耦合条件下工程材料的行为。高放废物处置库的工程材料包括玻璃固化体、废物罐(通常用碳钢、不锈钢等建造)和缓冲回填材料(包括膨润土及其与砂的混合物),起着阻滞放射性核素向外迁移、阻止地下水侵入处置库的重要作用。在地质处置库中—高温、地应力、水力、化学和辐射等作用的耦合下,这些材料的行为与常规行为有着巨大的差别,其变化规律一直是材料科学的前沿性课题。例如,辐射还原条件下玻璃固化体的溶解行为、应力和辐射作用下废物罐的腐蚀速率、中—高温条件下膨润土的相变及其吸附扩散能力的变化、地下水—废物罐—缓冲回填材料—处置库围岩的相互作用。

5) 放射性核素的地球化学行为及其随地下水的迁移行为。从高放废物处置库中释放出来的放射性核素将随地下水而迁移,从而影响处置库的性能。迁移行为一方面取决于地下水本身的运动规律,同时又与复杂的地球化学作用相关。对于原子序数小于 92 的元素,其地球化学行为已经有了较为深入的了解;但是对于原子序数大于 92 的元素,其地球化学行为则了解甚少,而这些元素正是高放废物中的关键放射性核素,如镅、钷、铈、镧和钍等,这些核素在深部地下水中的化学形态、络合行为、胶体特性等均是目前的科学难

题。处置库中放射性核素的迁移行为极为特殊,它们以超低速度溶解,又以超低浓度在地下水中迁移,发生吸附、扩散、弥散、对流等作用,且受胶体作用、微生物作用、腐殖质作用,以及辐射作用的综合影响,其迁移行为可以说是地球化学研究的空白领域。某些放射性核素具有非常活性的特点,如铀、碘 129、氡等核素非常难阻滞,因此,如何选择缓冲材料的添加剂阻滞放射性核素的迁移也是一项重要课题。同时,深部岩体中长时间尺度下地下水的运动,包括近场、多场甚至是相变条件下地下水的运动规律,也是重要的研究课题。

6) 处置系统的安全评价。处置系统是一个复杂的系统,包含大量的子系统(废物体子系统、废物罐子系统、缓冲材料子系统、回填材料子系统、近场子系统、远场子系统、地下水子系统、生物圈子系统和环境子系统等),又经历着各种因素的耦合作用,对其安全进行评

价对目前的科学水平和计算能力是一个极大挑战。就场址建模来说,需有地质模型、物理模型、数值模型,所需模拟的单元总数可达几百万个,考虑的变量也多达上百种,考虑的时间尺度达上百万年,需要用确定论算法、概率论算法、情景分析、后果分析、灵敏度分析等进行极为复杂的计算。

上述领域涉及到的均是前沿交叉科学问题,需开展综合、交叉研究才可能有所突破。正因为如此,高放废物地质处置的研究才受到世界科学界的重大关注。

4 展望

安全处置高放废物是科学、技术和工程界面临的挑战性问题,包括处置库场址地质演化的精确预测、深部地质环境特征、多场耦合条件下(中—高温、地壳应力、水力作用、化学作用、生物作用和辐射作用等)深部岩体、地下水和工

程材料的行为、低浓度超铀放射性核素的地球化学行为与随地下水迁移行为及处置系统的安全评价等一系列的关键科学问题。因此,国际上通过建设地下实验室开展了大量的基础和工程研究,包括处置库开挖技术、工程开挖损伤研究、废物罐可回取性、场址特性评价方法、场址水文地质特性、放射性核素迁移试验、放射性废物处置效应、工程屏障制造和性能、地质处置系统长期性能综合试验、原型处置库、天然类比、人工类似物等研究。这些研究极大地推动了高放废物地质处置技术开发,所获成果对安全处置高放废物起到了决定性的作用。可以预计,随着经费投入的不断加大及科学、技术和工程的发展和持续攻关,高放废物地质处置中的一些难点问题将会得到解决。反过来,这些问题的解决又将推动各个相关学科的发展。

参考文献(References)

- [1] Broderick M A. Radioactive waste management in perspective[J]. Journal of Radiological Protection, 1996, 16(4): 57-62.
- [2] SKB. The Äspö Hard Rock Laboratory[EB/OL]. 2015-07-05 [2016-06-05]. <http://www.skb.com/research-and-technology/laboratories/the-aspö-hard-rock-laboratory>.
- [3] POSIVA. ONKALO[EB/OL]. [2016-06-05]. http://www.posiva.fi/en/final_disposal/onkalo#.V5ANtvmer9k.
- [4] ANDRA. Research infrastructures[EB/OL]. 20109-08-03 [2016-06-05]. <http://www.andra.fr/international/pages/en/menu21/waste-management/research-and-development/research-infrastructure-1621.html>.

Geological disposal of high level radioactive waste: Key scientific issues and progress in China

WANG Ju

Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract The safe disposal of high level radioactive waste is a challenging task facing the scientific, technological and engineering communities. This paper reviews the latest progress of high level radioactive waste disposal programs, with focus on the progress in underground research laboratories, including the following key scientific issues: the precise prediction of the evolution of a repository site, the characteristics of deep geological environment, the behaviour of deep rock mass, groundwater and engineering materials under coupled conditions (intermediate to high temperature, geostress, hydraulic, chemical, biological and radiation process), the geochemical behaviour of transuranic radionuclides with low concentration and their migration with groundwater, and the safety assessment of the disposal system.

Keywords radioactive waste; geological disposal; safety evaluation

(编辑 韩丹焘)